

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию МИХАЛЫЧЕВА Александра Борисовича

«Квантовые измерения для метрологии и создания неклассических состояний»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

1. Соответствие диссертации специальностям и отрасли науки, по которым она представлена к защите.

Диссертация полностью соответствует отрасли физико-математических наук и пункту «Квантовая механика. Квантовая теория информации и квантовые вычисления» специальности 01.04.02 – теоретическая физика. Работа посвящена теоретическому исследованию процесса квантового измерения как процедуры извлечения информации, содержащейся в состоянии измеряемого квантового объекта и характеризующей его предшествующее взаимодействие с другими объектами, и как способа целенаправленного изменения такого состояния. Разработанные подходы обеспечивают решение ряда важных задач квантовой физики: формирования оптимальной стратегии проведения квантово-оптических измерений для наиболее эффективного извлечения информации о неизвестном квантовом состоянии, создания и усиления неклассических свойств квантово-оптических состояний, а также преодоления классических пределов чувствительности в оптике при использовании квантовых состояний-зондов.

2. Актуальность темы диссертации.

Теория квантовых измерений лежит в основе современных квантово-оптических технологий, активно развивающихся в настоящее время и обладающих значительными перспективами практических приложений: защиты и передачи информации, создания квантовых компьютеров, развития квантовых сенсоров, радаров и микроскопов. Эффективное использования уникальных возможностей, предоставляемых квантовыми системами для решения практических задач, требует как углубления понимания фундаментальных закономерностей, характеризующих получение информации и преобразование состояний при квантовых измерениях, так и выработки общих подходов к конструированию и оптимизации квантово-оптических устройств. Для решения данных задач в диссертации разработан ряд специальных методов: вероятностное управление квантовыми состояниями с помощью «исключающих» измерений, целенаправленное конструирование взаимодействия открытых квантовых систем с резервуарами, а также метод паттернов данных в применении к задачам квантовой томографии, микроскопии, конструирования и эмуляции квантовых состояний. Предложенные соискателем подходы и полученные результаты ценны для развития систем квантовой криптографии и квантовых вычислений (в частности, методы создания одно- и двухфотонных, а также перепутанных состояний), создания квантовых микроскопов, обеспечивающих преодоление дифракционного предела и важных для исследования биологических объектов, а также верификации и калибровки измерительных систем, применяемых в фундаментальных квантовых экспериментах. Следует также отметить, что результаты диссертационного исследования активно использовались в ряде научных проектов Института физики (включая

международные проекты), а тема диссертации соответствует пункту «Физика фундаментальных взаимодействий микро- и макромира, зарождающиеся технологии (квантовые, когнитивные, нейроцифровые, антропоморфные)» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы.

3. Степень новизны результатов диссертации и положений, выносимых на защиту.

В диссертационной работе получен и обоснован ряд научных результатов в области квантовой оптики и квантовой информатики, обладающих мировым уровнем новизны. Наиболее важные из них состоят в следующем.

Разработан метод вероятностного управления квантово-оптическими состояниями путем измерения и построено операторное описание сопутствующих преобразований квантовых состояний. По сравнению с аналогами данный метод характеризуется универсальностью и простотой реализации.

Предсказана возможность и определены условия эффективной генерации неклассических и перепутанных состояний при неунитарном управлении квантовыми состояниями в «фотонной пушке» на основе связанных нелинейных волноводов и одноатомном лазере. Использование неунитарного управления состояниями обеспечивает защиту генерируемых неклассических свойств от разрушения, отличающую данный подход от методов на основе унитарной динамики.

Построен унифицированный подход на основе метода паттернов данных, обеспечивающий эффективную итеративную томографию квантовых состояний и оптимизацию направленности излучения квантовых антенн, а также позволивший соискателю впервые предложить идею классической эмуляции квантовых экспериментов.

Разработан информационный подход к анализу, оптимизации и количественному описанию оптического разрешения в квантовой микроскопии. Ранее подробный теоретический анализ для многопараметрической задачи исследования сложных объектов не проводился.

Предложены новые методы описания, оптимизации и обработки результатов классических измерений рентгеновской дифрактометрии и ионной масс-спектрометрии, позволяющие значительно повысить эффективность расчетов и анализа данных по сравнению с существующими аналогами.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Основные научные положения и выводы диссертации основываются на значительных по объему теоретических исследованиях, использовании корректных моделей и проверенных теорий, соотношений и подходов, а также сравнении результатов с известными в литературе для случаев, когда такое сопоставление является возможным. Алгоритмы обработки корреляционных изображений и спектров, разработанные в диссертации для квантовой микроскопии, масс-спектрометрии и рентгеновской дифрактометрии, были проверены с использованием экспериментальных данных и продемонстрировали высокую точность и эффективность анализа.

Таким образом, обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций

диссертации, логично следующих из результатов работы, не вызывает сомнений.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации, рекомендации по их использованию.

Результаты диссертации имеют высокую значимость как для фундаментальных исследований в области квантовой оптики и теории квантовых измерений, так и для многих практических приложений в квантовой информатике, метрологии и микроскопии.

Методы неунитарного управления квантовыми объектами, предложенные в работе, расширяют множество генерируемых квантовых состояний по сравнению с известными ранее подходами и закладывают основу для дальнейшей разработки источников света с выраженными квантовыми свойствами. Представленный в диссертации информационный подход к исследованию и оптимизации квантовых измерений позволяет повысить эффективность использования измеренных данных в квантовой томографии и микроскопии, а также классических областях физики и важен для дальнейшего развития методов квантовой метрологии. Методологическая ценность полученных результатов указывает на целесообразность их дальнейшего внедрения в учебный процесс в Белорусском государственном университете и других учреждениях образования.

Практическая значимость работы обусловлена ценностью квантово-оптических состояний, методы генерации которых представлены в диссертации, для квантовой передачи и обработки информации, а также создания высокоточных квантовых сенсоров. Методы квантовой томографии, диагностики и оптимизации квантовых измерений, разработанные соискателем, важны для тестирования и калибровки источников квантового света, являющихся неотъемлемой частью большинства протоколов квантовой информатики. Информационный подход к квантовой микроскопии, предложенный автором, и разработанные на его основе методы оценки и повышения разрешения обеспечивают базис для практического создания квантового микроскопа – устройства, использующего квантовые свойства света для преодоления классического дифракционного предела разрешения.

Представленное в диссертации применение развиваемых автором методов за пределами квантовой оптики указывает на их универсальность и эффективность в других областях исследования. Разработанные на их основе алгоритмы обработки данных масс-спектрометрии и рентгеновской дифрактометрии имеют прямую практическую направленность и повышают эффективность решения конкретных прикладных задач.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

Результаты исследований по теме диссертации представлены в 118 публикациях, в том числе в 30 статьях в рецензируемых научных журналах, включенных в список ВАК, и иностранных рецензируемых научных журналах, и в 88 публикациях в сборниках материалов и тезисов конференций. Опубликованность результатов диссертационной работы удовлетворяет всем требованиям ВАК Республики Беларусь.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Содержание диссертации структурировано в форме одной обзорной главы и пяти глав, представляющих оригинальные результаты соискателя, и характеризуется внутренним единством и логичностью изложения. Текст диссертации и автореферата оформлен в

соответствии с требованиями ВАК РФ. Работа представляет собой законченное самостоятельное научное исследование и характеризуется внутренней согласованностью. Диссертация содержит 72 рисунка, 5 таблиц, а также 5 приложений, в которые включены вспомогательные материалы и математические выкладки, обеспечивающие более полное раскрытие содержания и результатов исследований. Автореферат отражает основное содержание диссертации, представляет ее защищаемые положения, общие выводы и рекомендации по использованию результатов.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Анализ содержания диссертационной работы и представленных публикаций по теме диссертации позволяет заключить, что автор полностью владеет современным состоянием исследований в области квантовой оптики и квантовой информатики. Научная квалификация А. Б. Михалычева, безусловно, соответствует искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

9. Замечания по диссертации.

Вначале хочу заметить, что термин волновой вектор (впервые появляющийся на стр.20), используемый в диссертации, не вполне корректно применен для обозначения широко используемого в квантовой теории термина квантовый вектор состояния. Напомню здесь, что волновой вектор это известный в оптике термин, применяемый к вектору, модуль которого равен волновому числу.

Теперь я хочу остановиться на наиболее важном для меня результате, полученном в диссертации А.Б. Михалычева.

Этот результат связан с квантовой теорией измерения.

Вначале я считаю полезным заметить, что фактически автор диссертации сделал серьезный шаг в важнейшей части современных исследований в области квантовых измерений, а именно, в области квантово-оптических измерений. Подчеркну, что проблемой измерения в квантовой теории стали активно интересоваться с момента ее создания (М.Борн, Дж.фон Нейман, Л.Мандельштам, Л.Ландау), ибо все эксперименты проводимые в области ядерной физики и физики элементарных частиц возможно понять только с привлечением квантовой теории и ее важнейшего раздела – квантовой теории измерений. Отмечу, что уже тогда были введены понятия прямого и косвенного измерения и отмечена важная роль при этом макроскопического прибора, подчиняющегося классическим законам.

Так, в лекциях по основам квантовой механики (теория косвенных измерений), прочитанных весной 1939 года академик Л.И.Мандельштам пишет (вторая лекция от 8 апреля 1939 года): “Последнее звено измерения в волновой механике обязательно макроскопично. Прямыми измерениями мы называем такие измерения, в которых первый же шаг макроскопичен.

Принцип косвенного измерения состоит в том, что данную систему, в которой мы хотим измерить величину А, мы заставляем взаимодействовать с другой микроскопической, для

которой уже возможно прямое измерение, и потом теоретически заключаем о значении А. Здесь взят случай прямого измерения во втором звене, но, вообще говоря, может быть сколько угодно промежуточных измерения. Лишь последнее должно быть макроскопическим.”

Аналогичное сказано и в квантовой механике Ландау и Лифшица (см. &7).

См.также анализ квантовой теории измерений в монографии David Bohm, Quantum theory 1952. Перевод Д.Бом,Квантовая теория, издательство “Наука”1965 (см.часть 6, Квантовая теория процесса измерения).

В этой связи встает важнейший вопрос в квантовой теории измерения, когда же возможно рассматривать измерительный прибор как классический. На стр.30 диссертации А.Б. Михалычева справедливо написано “Взаимодействие объекта и прибора формирует суперпозиционное (перепутанное) состояние данной составной системы, но не объясняет возможность обнаружения прибора только в одном из “классически допустимых” состояний.” Далее написано, что в современной квантовой теории неунитарность возникает благодаря рассмотрению измерительного прибора совместно с исследуемым объектом в качестве открытой системы, взаимодействующей с окружением-резервуаром. Вследствие этого в пределе идеального измерения исходное суперпозиционное состояние разрушается, превращаясь в смесь базисных состояний указателей прибора. Дальнейшее считывание показаний прибора наблюдателем позволяет определить, какая из возможностей данной статистической смеси реализовалась. В этом месте следовало бы сравнить , например, с анализом процесса измерения, данным в книге Л.Ландау и Е.Лифшиц “Квантовая механика &7, не используя представление об открытой системе.

Отмечу также,что уважаемый Александр Борисович следует рассуждениям очень многих физиков, закрывая глаза на то, что конечным наблюдателем-прибором является человек и его тоже нужно включать в рассуждения (см., например, цитированную выше монографию Д.Бома). Понятно, что после такого включения мы попадаем в сферу, которая заставляет задуматься о проблемах мироздания. Думаю, что в последующей своей научной деятельности этот вопрос Александру Борисовичу нельзя оставлять без внимания и попытаться применить квантовую теорию к самому человеку-наблюдателю. Тем более, что докторская диссертация Александра Борисовича, в которой получено много новых и важных научных результатов, показывает, что он способен взяться и за такой чрезвычайно сложный вопрос. Я понимаю, что окончательный ответ , видимо, не будет получен, но большее понимание механизма осознания результатов наблюдения будет получено, что уже немаловажно.

10. Заключение.

На основании сказанного выше я полагаю, что диссертация Александра Борисовича Михалычева полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским

диссертациям по специальности 01.04.02-теоретическая физика, а он сам заслуживает искомой степени доктора физико-математических наук за следующие результаты:

- разработку метода вероятностного управления квантово-оптическими состояниями на основе «исключающих» измерений для генерации неклассических и перепутанных оптических состояний и построение операторного описания преобразования квантовых состояний в результате таких измерений и диссипативного взаимодействия с окружением;
- разработку методов создания субпуассоновских и бифотонных состояний в системах нелинейных диссипативно связанных волноводов;
- предсказание эффектов фазовой и амплитудной бистабильности в динамике одноатомного лазера с некогерентной накачкой при условии начального когерентного возбуждения поля и определение условий для генерации неклассических состояний поля в такой системе;
- разработку методов адаптивной квантовой томографии, эмуляции квантовых экспериментов с использованием классических состояний, а также управления пространственной и корреляционной структурой излучения квантовой антенны на основе развития и обобщения метода паттернов данных;
- разработку информационного подхода к количественной оценке достижимого оптического разрешения в квантовом микроскопе, а также методов его повышения на основе использования корреляционных функций высших порядков и итеративного алгоритма реконструкции изображений;
- разработку методов повышения точности измерений и эффективности анализа данных в рентгеновской дифрактометрии и масс-спектрометрии на основе использования информации Фишера, байесовской оценки вероятностей моделей и операторного описания рентгеновских оптических элементов.

Я, Барышевский Владимир Григорьевич, даю согласие на публикацию данного отзыва в открытом доступе на официальном сайте Института физики НАН Беларуси.

Главный научный сотрудник лаборатории
физики высоких плотностей энергии
Института ядерных проблем
Белорусского государственного университета,
доктор физико-математических наук,
профессор



В. Г. Барышевский

17.05.2023

